第46卷 第2期
2023年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 2
Feb. 2023

基于同位素揭示艾比湖流域地下水特征

刘景明[1,2,3]， 丁建丽[1,2]， 包青岭[1,2,3]， 张子鹏[1,2,3]， 姜磊鹏[1,2,3]， 曲 艺[1,2,3]

（1. 新疆大学地理与遥感科学学院，新疆 乌鲁木齐 830046；2. 新疆绿洲生态重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830046；3. 智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830046）

摘 要： 地下水对于调节干旱区水循环和生态系统具有重要意义，认识和管理地下水资源是防止河流基流减少，地面沉降和水质退化的关键。通过分析艾比湖流域地下水水化学参数和氢氧稳定同位素特征，结合线性回归、双端元混合模型和GIS空间分析等方法，探讨不同区域地下水补给来源和水化学组分动态变化。结果表明：(1) 博尔塔拉河（简称博河）和精河中下游区域氢氧同位素（δ^2H与$\delta^{18}O$）值最大，艾比湖周边区域次之，博河上游区域最小，流域地下水存在不同的循环过程。(2) 地下水氘盈余（*d*-excess）和水化学特征反映了地下水不同的补给机制和影响因素，博河上游区域地下水主要受冰川积雪融水补给；博河和精河中下游地下水主要来源为地表水和降水，同时受岩层性质、农田开发和灌溉措施影响较大；艾比湖周边地下水主要来源于冰雪融水和降水。中下游区域和河湖交汇区地下水是防控和治理的重点区域。(3) 地下水流动系统Ⅰ的电导率（Electrical conductance，EC）在210.00~2500.00 $\mu S\cdot cm^{-1}$之间，*d*-excess在6.47‰~9.70‰之间；流动系统Ⅱ EC在141.60~5260.00 $\mu S\cdot cm^{-1}$之间，*d*-excess在9.61‰~17.45‰之间，地下含水层存在不同的水力联系。研究结果对艾比湖流域地下水氢氧同位素和水化学驱动机制的探讨，可以为流域地下水资源的合理利用及科学开发提供一定的理论参考依据。

关 键 词： 氢氧同位素；水化学组分；地下水补给；地下水流动系统；艾比湖流域

文章编号： 1000－6060(2023)02－0201－10(0201～0210)

大规模的地下水开采造成地面沉降、干旱期泉水和河流基流减少、咸水入侵、水质退化、甚至全球海平面上升等问题，并对世界各地的生态系统造成损害[1]。特别是内陆干旱地区，地下水对于调节水文循环和维系生态系统健康至关重要[2]。其中地下水的补给、交换机制和组成成分是水文学和水文地质学的基本问题之一。在传统的常规手段较难获取这些信息的情况下，同位素水文学技术已被证明是解决许多关键水文问题和过程的有效工具，同时开展水化学多方法联合示踪并相互验证可以提高评价精度[3-4]。

利用水化学和同位素方法对干旱区流域地下水补给和水循环的研究已有开展。通过对比地下水与潜在水源的同位素组成可以示踪干旱区地下水补给来源[5]，Yapiyev等[6]通过水的氢氧同位素组成确定中亚地区的蒸发损失和地下水输入；Joshi等[7-8]利用水同位素追踪印度恒河流域地下水补给源；Jesiya等[9-10]根据地下水的稳定同位素时间序列数据研究地下水补给机制。同时，结合水化学和氢氧稳定同位素指标成为定量评价地下水与河水交换的有效手段[11]，文广超等[12-15]学者分别研究了鄱阳湖、孔雀河、伊犁河谷和巴音河流域地下水和地表水转换关系。在艾比湖流域地下水的相关研究中，郝帅等[16-18]分析了流域地下水氢氧稳定同位素的时空变化特征，揭示了水体稳定同位素与环境要素关系；朱世丹等[19-20]结合水化学和氢氧稳定同位素技术，分析艾比湖主要入湖河流氢氧同位素及水化学的组成特征，但地下水涉及较少。因此，本次工作在

收稿日期： 2022-05-18； **修订日期：** 2022-06-14
基金项目： 国家自然科学基金项目（42171269）；新疆院士工作站项目（2020.B-001）资助
作者简介： 刘景明（1996-），男，硕士，主要从事干旱区生态水文等研究. E-mail: 1198917186@qq.com
通讯作者： 丁建丽（1974-），男，教授，博士生导师，主要从事干旱区资源与环境遥感与建模研究. E-mail: watarid@xju.edu.cn

前人研究的基础上，综合利用水化学和氢氧稳定同位素开展艾比湖流域地下水研究。

艾比湖流域作为“一带一路”沿线尤为重要的核心区域，其水土安全问题关系到国家战略实施[21]。艾比湖流域具有典型的干旱区生态环境特征，近年来由干旱引发的湖泊面积萎缩，使湖滨周边干涸湖底大面积裸露且严重盐碱化[22]。而地下水资源对流域生态环境和区域水资源管理至关重要，提供地下水的稳定同位素和水化学组成证据，可以为跨流域调水和流域治理提供理论指导。研究的具体目标是（1）艾比湖流域地下水同位素水化学特征；（2）确定补给源和补给特征；（3）了解艾比湖流域含水层系统的流动系统。

1 研究区概况

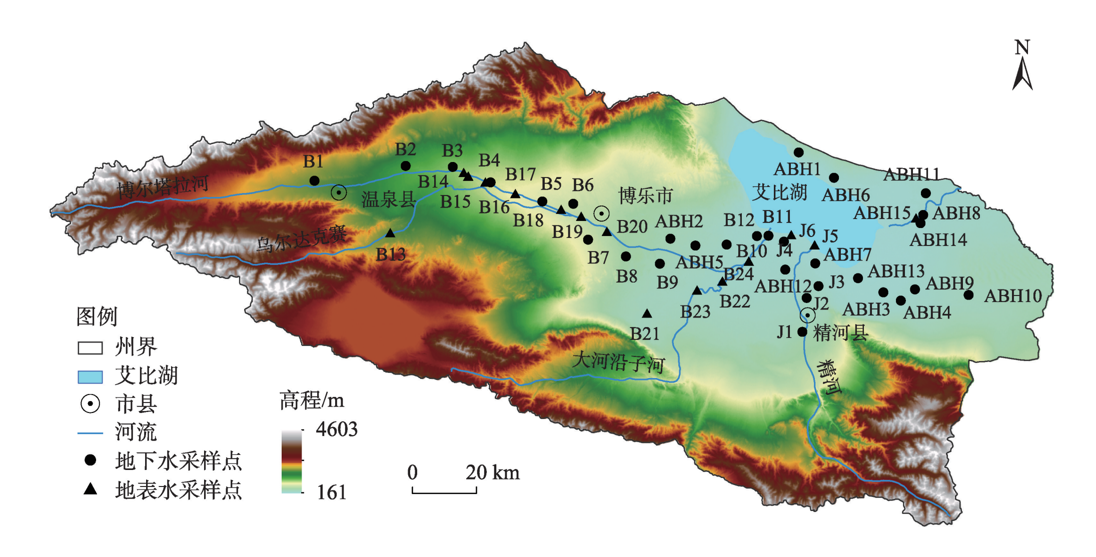
艾比湖流域位于新疆维吾尔自治区博尔塔拉蒙古自治州精河县北部，湖泊呈西北—东南走向，地理位置位于44°34′~45°08′N、82°35′~83°16′E之间（图1）。流域地势较低，是一个半闭合的洼地，东边开口，其他三面被高山环绕，湖盆是盆地内地表水和地下水的汇集中心。根据博尔塔拉政府网（http://www.xjboz.gov.cn/zjbz.htm）公布的2018年博州水资源公报可知，全流域地表水开采量从1980年的1.35×10^8 m^{3}增加到2018年的9.98×10^8 m^3，地下水呈严重超采状态。根据全州19眼地下水观测井统计，全州地下水埋深平均下降了0.12 m（较上年增加0.26 m）。

2 材料与方法

2.1 样本采集与测试

本研究于2020年和2021年7月对流域地表水和地下水进行采集，采样点主要取自博河、精河断面和艾比湖周边管护站，共采集地下水样本30个和地表水样本15个。所有水样都收集在150 mL的聚乙烯瓶中，并在现场用样品水冲洗瓶子2次。为避免样品的扩散和蒸发损失，密封并冷冻样品瓶，野外任务结束后立即带到实验室进行同位素分析。采样期间，使用手持全球定位系统接收器记录了样本坐标和海拔。

水化学分析在室内25 ℃进行，电导率（Electrical conductance，EC）、溶解性总固体（Total dissolved solids，TDS）和盐度（Salinity，SAL）采用电导率仪（Multi 3420 Set B，WTW GmbH，Germany）测定，酸碱度（pH）采用离子选择性电极法测定，取3次平均值作为最终的结果。水样的氢氧同位素测试使用全自动真空冷凝抽提系统（LI-2100，Automatic water extraction system）和液态水稳定同位素分析（TIWA-45-EP，Los Gatos Research）完成样本的提取和测试。每个样本进行6次分析，考虑记忆效应，采用后4次的分析结果。测得的氢氧稳定同位素含量为维也纳标准平均大洋水（V-SMOW）的千分偏差，计算公式为：



注：图中B1~B24为博河断面的采样点；J1~J6为精河断面的采样点；ABH1~ABH15为艾比湖管护站的采样点。下同。

图1 采样点区域示意图

Fig. 1 Location of sampling sites in the study area

$$\delta(‰)=\frac{R_{sample}-R_{standard}}{R_{standard}} \tag{1}$$

式中：R_{sample} 为样本；$R_{standard}$ 为标样。测试结果以相对V-SMOW千分偏差表示（δ,‰），测试精度：$\delta^{2}O$ 为±0.33‰，$\delta^{18}H$ 为±0.5‰。

2.2 研究方法

2.2.1 线性回归方程的拟合 最小二乘法（又称最小平方法）是一种数学优化技术。它通过最小化误差（真实目标对象与拟合目标对象的差）的平方和寻找数据的最佳函数匹配[23]。最小二乘法可用于曲线拟合，利用最小二乘法建立不同区域地下水$\delta^{2}H$与$\delta^{18}O$之间的线性回归方程，设拟合直线的公式为：

$$y=kx+b \tag{2}$$

式中：y为$\delta^{2}H$值；x为$\delta^{18}O$值；b为方程截距；拟合直线的斜率为 $k=\frac{\sum xy-n\bar{x}\bar{y}}{\sum x^{2}-n\bar{x}^{2}}$；计算出斜率后，根据$(\bar{x},\bar{y})$和已经确定的斜率$k$，利用待定系数法求出截距$b$。

2.2.2 地下水补给率的计算 根据线性回归方程的拟合结果，利用同位素守恒规律，假设地下水样本的同位素组成是通过混合2个端元组分得出的，即降水和地表水，使用双端元混合模型估算流域地下水的补给率[7,24]。因为$\delta^{18}O$水转化率精度高于$\delta^{2}H$[25]，因此公式可表示为：

$$Q_{p}/Q_{s}=(\delta^{18}O_{g}-\delta^{18}O_{s})/(\delta^{18}O_{g}-\delta^{18}O_{p}) \tag{3}$$

$$Q_{s}/Q_{g}=(\delta^{18}O_{g}-\delta^{18}O_{p})/(\delta^{18}O_{s}-\delta^{18}O_{p}) \tag{4}$$

式中：Q_{p}、Q_{g}、Q_{s}分别为降水量、地下水量、河水量；$\delta^{18}O_{p}$、$\delta^{18}O_{g}$、$\delta^{18}O_{s}$分别为降水量、地下水量、河水量的$\delta^{18}O$值。

2.2.3 瑞利分馏方程 瑞利分馏模型本源于描述相反应过程中混合在一起的两种不同溶液的蒸馏过程，后被用于描述开放系统中稳定同位素的非平衡分馏过程。根据瑞利分馏公式，$\delta^{18}O$存在如下关系[26]：

$$\delta^{18}O-\delta^{18}O_{0}=\varepsilon\ln f \tag{5}$$

式中：$\delta^{18}O$为蒸发后样品的同位素值；$\delta^{18}O_{0}$为初始同位素值；ε为富集系数；f为剩余水比例。

3 结果与分析

3.1 地下水氢氧稳定同位素空间异质性

3.1.1 不同区域地下水氢氧同位素特征 地下水采样点主要分布在博河、精河和艾比湖周边区域，由于精河上游取样难度大，只取得中下游地下水。博河、精河区域井深15~100 m，艾比湖周边管护站井深30~260 m。由表1均值可知，整个流域$\delta^{2}H$和$\delta^{18}O$最大值位于博河和精河中下游区域，艾比湖周边区域次之，博河上游区域最小；氘盈余（d-excess）最大值位于艾比湖周边区域，博河上游区域次之，博河和精河中下游区域最小。地下含水层分布在地表以下，因此地下水氢氧稳定同位素的区域异质性表明流域地下水受到补给源和水岩作用的影响。

3.1.2 地下水氘盈余空间特征 氘盈余（d-excess）最早由Dansgaard定义并量化[27]，$d=\delta^{2}H-8\delta^{18}O$，反应了包括空气湿度、海洋表面温度和风速的变化，也可反映该地区水–岩氧同位素交换程度[28]。整个流域d-excess范围从6.47‰到17.45‰，平均值为10.67‰。为进行流域d-excess参数空间特征分析，将全球大气降水线及其d=5、10、15时的特征线绘出。从图2中可以看出，博河、精河中下游区域主要位于d=5和d=10特征线之间，而艾比湖周边地下水主要位于d=10和d=15特征线之间，表明流域不同区域地下水存在不同的循环过程。

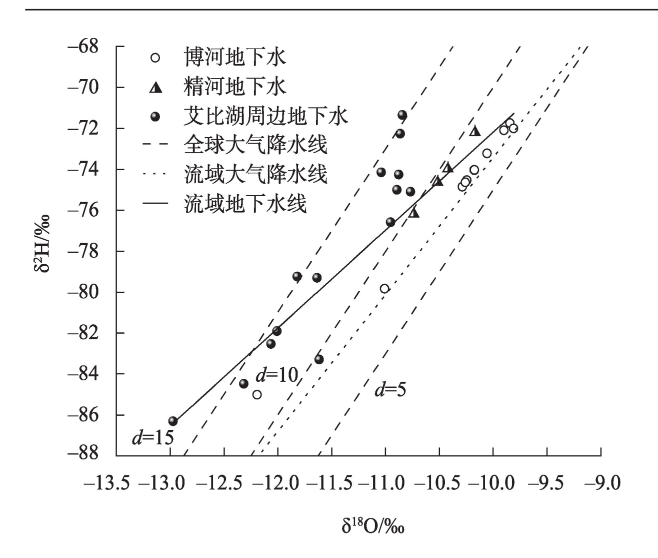
图3a显示出整个流域内地下水的d-excess在空间上的变化。水平分布上，博河、精河流域地下水采样点分布在距河流0~8 km（图3b）。不同距离下d-excess表现出聚集特征，一定程度表明其地下水横向连通性较好。精河流域J1和J4与艾比湖距离

表1 不同区域氢氧同位素值

Tab. 1 Isotopic values of hydroxide in different regions /‰

区域	$\delta^{2}H$			$\delta^{18}O$			d-excess		
	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值
博河上游区域	−79.84	−85.02	−82.43	−11.01	−12.19	−11.60	12.50	8.22	10.36
博河和精河中下游区域	−71.75	−76.20	−73.73	−9.81	−10.74	−10.20	9.70	6.47	7.85
艾比湖周边区域	−71.35	−86.32	−78.27	−10.77	−12.97	−11.48	17.45	9.62	13.53

注：d-excess为氘盈余。下同。



注：*d*-excess（*d*）为氘盈余。下同。

图2 艾比湖流域地下水 *d*-excess特征

Fig. 2 Groundwater *d*-excess characteristics in Ebinur Lake Basin

不同导致的同位素差异特征，与精河地表水同位素特征一致[20]。艾比湖周边区域地下水位高（平均深度95 m），距河湖远，且受外界环境因素影响较小，氢氧同位素整体显现出贫化特征。其中ABH6距艾比湖较近（2.97 km），而*d*-excess相对较低，可能受到岩石含氧化合物的化学组分和含水层的温度影响。距湖3~6 km内*d*-excess差异性可能反映了区域含水层系统的非均质和各向异性导致的有限横向连通性[7]。垂直分布上（图3c），除ABH8和ABH12极端样本以外，回归分析表明拟合关系不存在显著性意义，相关系数极小，地下水*d*-excess没有表现出深度效应，未来需要更多的同位素指标去分析验证。

3.2 地下水补给特征和影响因素

3.2.1 地下水δ^2H与$\delta^{18}O$相互关系 图4a为艾比湖流域地下水δ^2H与$\delta^{18}O$相互关系，其δ^2H与$\delta^{18}O$有显

图3 艾比湖流域地下水 *d*-excess随河湖距离和深度的变化

Fig. 3 Changes of groundwater *d*-excess with distance of rivers and the lake and depth in Ebinur Lake Basin

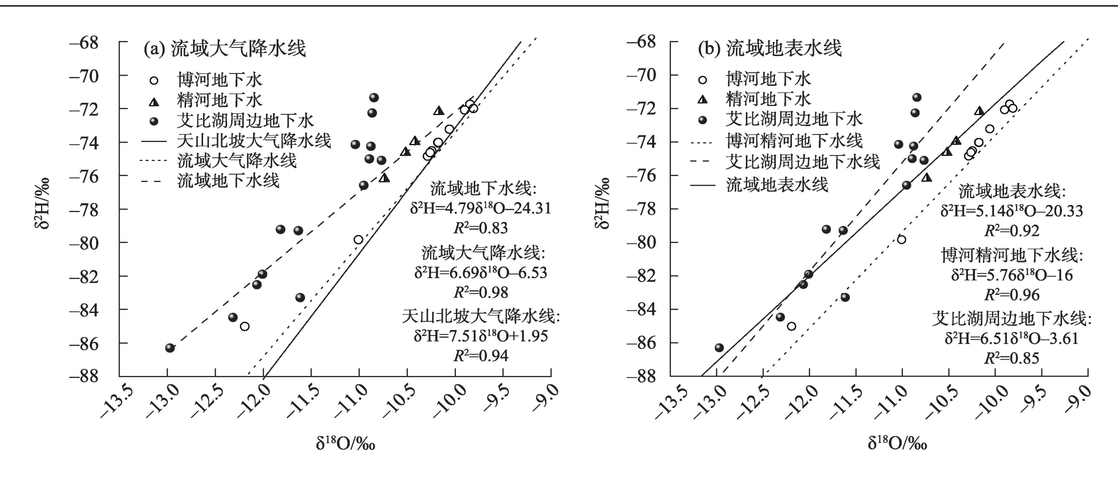
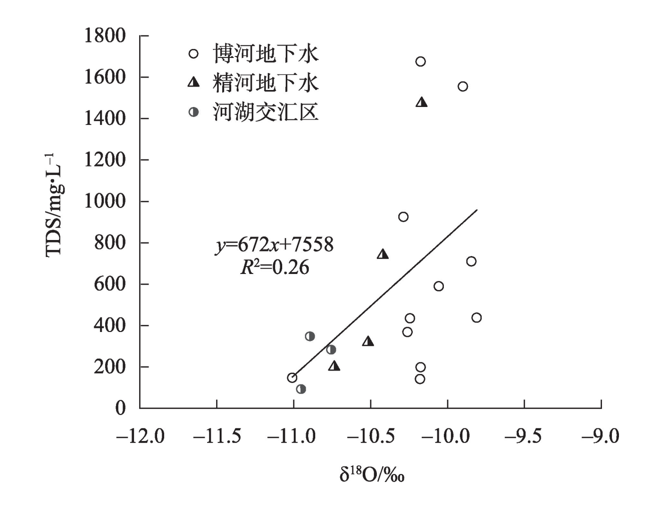


图4　艾比湖流域地下水δ^2H与δ^{18}O相关关系

Fig. 4　Correlation between groundwater δ^2H and δ^{18}O in Ebinur Lake Basin

著线性关系(R^2=0.83，P<0.001)，关系式为δ^2H=4.79δ^{18}O−24.31。艾比湖地区处于西风带，受季风影响很弱[20]，这使区域地下水同位素值偏离降水线和地表水线。根据Wang等[29]在天山北坡、Hao等[18]在艾比湖流域的降水稳定同位素统计数据可知，天山北坡的大气降水线为δ^2H=7.51δ^{18}O+1.95，流域大气降水线为δ^2H=6.69δ^{18}O−6.53(图4a)。干旱区气候干燥，空气湿度小，降水的云下蒸发强烈，再加上局地循环水汽的混合导致降水中同位素的动力分馏现象，地下水δ^2H与δ^{18}O关系线整体位于天山北坡大气降水线和流域大气降水线的上方，斜率和截距均小于二者，且具有负截距，表明地下水接受降水补给的同时也经历了一定程度的蒸发富集，这与干旱区石羊河流域的研究一致[30]。其中博河地下水基本位于流域大气降水线上，表明地下水主要来源于降水，精河地下水位于流域大气降水线上方，表明该区域降水补给期间的蒸发分馏作用与博河不同。博河和精河地下水位于流域地表水线附近(图4b)，表明受到地表水补给的影响，博河和精河地下水主要补给源是地表水和降水；艾比湖周边地下水位于流域大气降水线上方，δ^{18}O较低，表现出贫化特征，且部分地下水处在流域地表水线的延伸线上，表明地下水主要来源于冰雪融水和降水，部分地下水受地表水补给。结合Tan等[31]学者的研究发现，蒸发对同位素的主要影响集中在上层土壤层，对地下水的影响较弱。因此，流域地下水的同位素变化主要受补给源的影响。

3.2.2　地下水影响因素分析　基于地表水交换区δ^{18}O的平均值及式4对地下水补给率进行计算(博河、精河中下游地下水和地表水平均值为−10.31‰、−11.84‰，河湖交汇区地下水和地表水平均值为−11.39‰、−11.84‰)，参考艾比湖流域降水δ^{18}O平均值−4.38‰[17]，得出博河和精河中下游地表水对地下水的补给率为79.7%，降水补给率为20.3%。河湖交汇区地表水对地下水的补给率为93.9%，降水补给率为6.1%。该结果相较郝帅等[16]计算的中下游河水和地下水之间交换比例偏高，主要是季节灌溉回流补给作用大，也可能是参考降水δ^{18}O与实际采样时间差异导致的。从地下水TDS与δ^{18}O关系图可知，地下水同位素与TDS的相关性较低，表明地表水和降水的补给对TDS含量的影响较小(图5)。已知地下水最富集样本δ^{18}O为−9.81‰，最贫化样本δ^{18}O为−11.01‰，参考艾比湖流域富集



注：TDS为溶解性总固体含量。

图5　艾比湖流域地下水TDS与δ^{18}O关系

Fig. 5　Relationship between groundwater TDS and δ^{18}O in Ebinur Lake Basin

系数为-83.33‰[18]，根据瑞利分馏公式，计算得到剩余水比例为98%。再根据质量平衡原理，假设蒸发是控制TDS的主要因素，地下水TDS含量应为 $C=\frac{C_0}{f}=\frac{94.87\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}}{0.98}$ =96.81 mg·L^{-1}（C_0对应地下水最小TDS含量）。这与地下水实际TDS含量变化相差较大（图5），因此必然存在其他因素影响地下水的TDS变化。水中TDS主要由水中的HCO_3^-、Ca^{2+}的浓度决定，受采样区范围内的岩石风化作用的控制[32]，因此需要结合水位和水质数据进一步评估。

3.2.3 地下水氘盈余沿程变化 图6a~b显示的是博河和精河流域*d*-excess从上游到下游的空间变化趋势。博河上游地下水*d*-excess较高，中下游区域较为稳定，下游区域存在波动。精河中下游区域地下水*d*-excess沿程逐渐降低，但整体比博河中下游高。博河上游区域B1样点*d*-excess较高，且δ^{18}O与郝帅等[16]在博河上游山谷冬季雪水氧同位素相近（均值-18.63‰），反映上游靠近山区，主要补给源是冰川融水，气温低，蒸发弱。中下游区域*d*-excess总体较低，表明补给地下水存在一定蒸发富集。根据地下水补给率的计算，可知存在蒸发富集的地表水对地下水补给频繁。B5到B7位于中段区域，该区域的特点是城市化程度高，工农业发达，水利灌溉设施密集，这与埃及尼罗河流域密集农业措施影响地下水稳定同位素比率；水面积和灌溉面积的增加导致石羊河流域年蒸发量的增加研究类似[33-34]，灌溉回流对地下水的补给可能是地下水同位素特征蒸发富集的一种解释。下游B9和B10地下水*d*-excess向上波动，可能由于井较深（85 m），与地表水交换相对较少，蒸发分馏作用弱。B12非常接近艾比湖，湖水的交换作用可能导致同位素值偏高。J3与J4位于精河下游区域，与地表水转换频繁，且靠近艾比湖盐区，*d*-excess富集特征明显。

3.3 地下水流动系统

3.3.1 不同区域地下水水化学特征及沿程变化 除博河B9（pH=6.39）和B10（pH=6.78）样点外，整个流域地下水pH范围为7.21~9.23，属于弱碱性；除邻近艾比湖的ABH12样点外，流域地下水含盐量接近于1 dS·m^{-1}。由均值可知，艾比湖周边区域地下水各水化学指标都大于博河和精河流域；由最小和最大值可知，艾比湖周边区域地下水水化学参数变化范围大于博河和精河流域地下水（表2）。

从水化学参数的沿程变化（图7a~b）可知，博河、精河中下游和博河上游地下水水化学参数差异

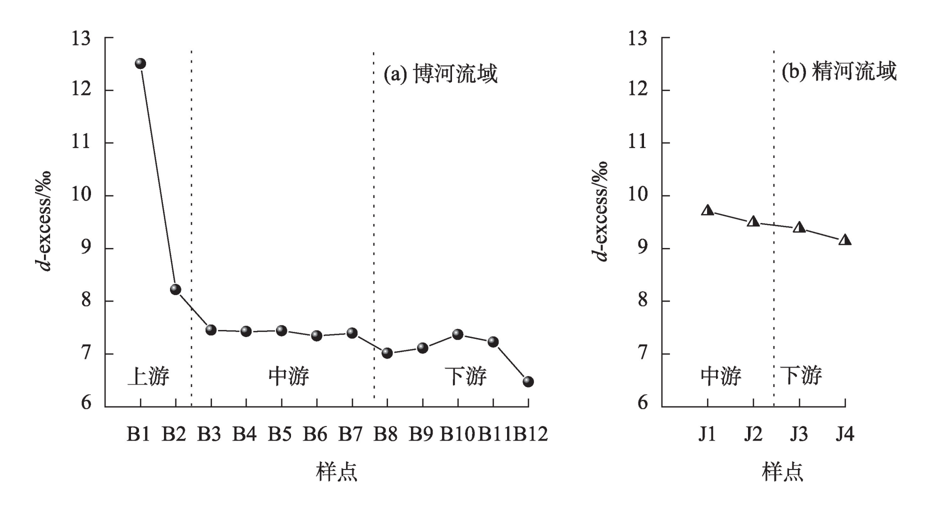


图6 博河和精河流域地下水*d*-excess沿程变化

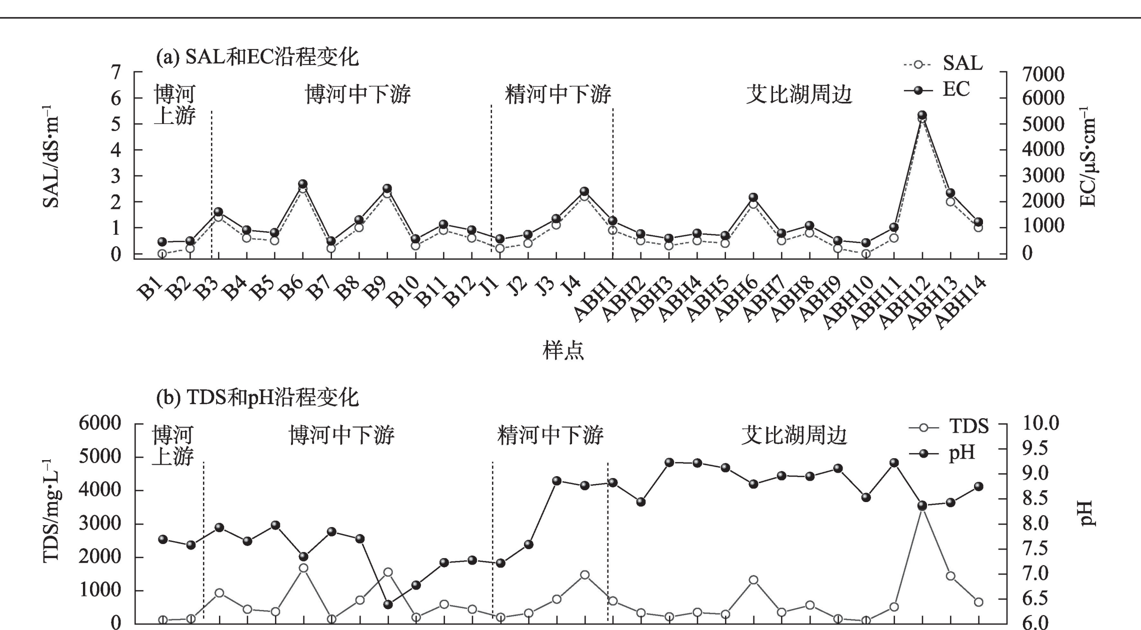
Fig. 6 Groundwater *d*-excess variation in Bortala and Jing River Basin along the flow path

表2 艾比湖流域水化学参数特征

Tab. 2 Characteristics of water chemistry parameters in Ebinur Lake Basin

区域	pH			EC/μS·cm^{-1}			TDS/mg·L^{-1}			SAL/dS·m^{-1}		
	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值
博河和精河流域	8.86	6.39	7.62	2500.00	175.00	935.69	1675.00	117.25	626.91	2.50	0.00	0.90
艾比湖周边区域	9.23	8.37	8.85	5260.00	141.60	1115.40	3524.20	94.87	747.32	5.20	0.00	1.05

注：pH为酸碱度；EC为电导率；TDS为溶解性总固体含量；SAL为盐度。下同。



注：SAL为盐度；EC为电导率；pH为酸碱度。

图7 艾比湖流域地下水水化学特征沿程变化

Fig. 7 Variation of hydrochemical characteristics of groundwater in Ebinur Lake Basin

明显，上游区域EC均值小于200 μS·cm⁻¹。中下游EC均值大于200 μS·cm⁻¹。艾比湖周边地下水EC变化范围最强，博河次之，精河最弱。结合氢氧同位素特征，中下游区域和河湖交汇区地表水与地下水交换密切，同时考虑周边农田灌溉等人类活动影响，这些区域是地下水防控和治理的重点区域。

3.3.2 不同区域地下水流动特征 结合朱世丹和雷米等[20,35]的研究发现，除个别样点，精河、博河地表水的δ^2H与δ^{18}O从上游到下游逐渐偏正，表明地下水与地表水的流向基本一致。根据δ^2H、δ^{18}O和*d*-excess，结合水化学指标的变化范围可将流域分为2个不同的流动系统（表3）。从EC变化特征来看，流动系统Ⅰ的离子含量可能要低于流动系统Ⅱ，说明2个系统的地球化学环境不同。从同位素特征看，流动系统Ⅰ的同位素*d*-excess范围比流动系统Ⅱ更小。从井深来看，流动系统Ⅰ地下水深度均在15~100 m之间，而流动系统Ⅱ地下水深度在30~260 m之间，所以这2个系统可能分属于水力联系不同的流动系统。

4 结 论

本文结合线性回归、双端元混合模型和GIS空间分析等方法，分析了艾比湖流域地下水氢氧同位素和水化学的空间异质性，探讨了艾比湖流域地下水补给特征以及影响补给的因素，揭示了艾比湖流域含水层的流动特征。

（1）艾比湖流域不同区域地下水氢氧同位素存在空间异质性。总体来看，氢氧同位素值最大位于博河和精河中下游区域，艾比湖周边区域次之，博河上游区域最小，流域地下水主要受到补给源和水岩作用的影响。水平分布上，博河、精河流域地下水*d*-excess表现出聚集特征，而艾比湖周边地下水

表3 地下水流动系统的氢氧同位素特征

Tab. 3 Isotopic characteristics of groundwater flow systems

类别	δ^2H/‰	δ^{18}O/‰	*d*-excess/‰	EC/μS·cm⁻¹	关系式	R^2
流动系统Ⅰ	−79.84~−71.75	−11.01~−9.81	6.47~9.70	210.00~2500.00	δ^2H=5.81δ^{18}O−14.62	0.86
流动系统Ⅱ	−86.32~−71.35	−12.97~−10.77	9.61~17.45	141.60~5260.00	δ^2H=6.72δ^{18}O−1.33	0.86

注：R^2为线性回归决定系数。

表现出分异特征。垂直分布上，*d*-excess没有表现出深度效应。

（2）艾比湖流域不同区域地下水存在不同的补给机制和补给特征。地下水δ^2H与$\delta^{18}O$关系线的斜率和截距均小于天山北坡大气降水线和流域大气降水线，表明地下水受到一定程度的蒸发分馏。结合不同区域*d*-excess特征可知，博河上游区域地下水主要受冰川积雪融水补给；博河和精河中下游地下水主要来源为地表水和降水，同时受岩层性质、农田开发和灌溉措施影响较大；艾比湖周边地下水主要来源于冰雪融水和降水，部分地下水受地表水补给。结合EC变化特征可知，精河、博河中下游区域和河湖交汇区地下水是防控和治理的重点区域。

（3）不同区域地下水水化学特征沿程变化明显。结合氢氧稳定同位素差异性，判断流域地下水存在2个不同的流动系统。流动系统Ⅰ EC在210.00~2500.00 $\mu S\cdot cm^{-1}$之间，*d*-excess在6.47‰~9.70‰之间，而流动系统Ⅱ EC在141.60~5260.00 $\mu S\cdot cm^{-1}$之间，*d*-excess在9.61‰~17.45‰之间，表明含水层存在不同的水力联系。

本文根据已有数据很好的揭示了艾比湖流域地下水特征，但是为了进一步理清地下水多源补给区和补给方式、垂直分异规律，在如此大规模的含水层系统中，需要水力计算进一步验证我们的结果。未来还要重复访问这些样点，增加样本点和利用多种同位素示踪，以理清地下水同位素水化学年内、年际分异特征，以期为干旱半干旱地区跨流域调水、水权、入湖水量分配和流域治理等提供理论支撑。

参考文献（References）

[1] Dandge K, Patil S. Spatial distribution of ground water quality index using remote sensing and GIS techniques[J]. Applied Water Science, 2022, 12(1): 1-18.

[2] Ma F, Chen J, Chen J, et al. Hydrogeochemical and isotopic evidences of unique groundwater recharge patterns in the Mongolian Plateau[J]. Hydrological Processes, 2022: e14554, doi: 10.1002/hyp.14554.

[3] 顾慰祖, 庞忠和, 王全九, 等. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1-1113. [Gu Weizu, Pang Zhonghe, Wang Quanjiu, et al. Isotopic hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2011: 1-1113.]

[4] Krajcar Bronić I, Barešić J. Application of stable isotopes and Tritium in hydrology[J]. Water, 2021, 13(4): 430, doi: 10.3390/w13040430.

[5] 赵春, 张勇勇, 赵文智, 等. 稳定同位素在干旱区水分传输过程的研究进展[J]. 生态科学, 2020, 39(5): 256-264. [Zhao Chun, Zhang Yongyong, Zhao Wenzhi, et al. Application of stable isotopes on water exchange in the arid region: A review[J]. Ecological Science, 2020, 39(5): 256-264.]

[6] Yapiyev V, Skrzypek G, Verhoef A, et al. Between boreal Siberia and arid Central Asia: Stable isotope hydrology and water budget of Burabay National Nature Park ecotone (Northern Kazakhstan)[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020, 27: 100644, doi: 10.1016/j.ejrh.2019.100644.

[7] Joshi S K, Rai S P, Sinha R, et al. Tracing groundwater recharge sources in the northwestern Indian alluvial aquifer using water isotopes ($\delta^{18}O$, δ^2H and ^3H)[J]. Journal of Hydrology, 2018, 559: 835-847.

[8] Rai S P, Noble J, Singh D, et al. Spatiotemporal variability in stable isotopes of the Ganga River and factors affecting their distributions[J]. Catena, 2021, 204: 105360, doi: 10.1016/j.catena.2021.105360.

[9] Jesiya N, Gopinath G, Resmi T. Comprehending the groundwater recharge of a coastal city in humid tropical setting using stable isotopes[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 287: 112260, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112260.

[10] Ma J, Li Z, Ma B, et al. Determination of groundwater recharge mechanisms using stable isotopes in small watersheds of the Loess Plateau, China[J]. Hydrogeology Journal, 2021, 29(2): 765-781.

[11] 王雨山, 郭媛, 周殷竹, 等. 基于水化学和同位素评价马莲河下游地下水补给河水的时空变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 290-298. [Wang Yushan, Guo Yuan, Zhou Yinzhu, et al. Quantifications of spatial and temporal variations in groundwater discharge into a river using hydrochemical and isotopic tracers[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 290-298.]

[12] 文广超, 王文科, 段磊, 等. 基于水化学和稳定同位素定量评价巴音河流域地表水与地下水转化关系[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 734-743. [Wen Guangchao, Wang Wenke, Duan Lei, et al. Quantitatively evaluating exchanging relationship between river water and groundwater in Bayin River Basin of northwest China using hydrochemistry and stable isotope[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(4): 734-743.]

[13] 许秀丽, 李云良, 谭志强, 等. 鄱阳湖典型湿地地下水-河湖水转化关系[J]. 中国环境科学, 2021, 41(4): 1824-1833. [Xu Xiuli, Li Yunliang, Tan Zhiqiang, et al. Groundwater, river water and lake water transformations in a typical wetland of Poyang Lake[J]. China Environmental Science, 2021, 41(4): 1824-1833.]

[14] 张俊, 尹立河, 顾小凡, 等. 同位素水化学指示的新疆孔雀河流域地下水与地表水关系[J]. 西北地质, 2021, 54(1): 185-195. [Zhang Jun, Yin Lihe, Gu Xiaofan, et al. Study on the relationship between groundwater and surface water in Xinjiang Kongque River Basin using isotopes and hydrochemistry method[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(1): 185-195.]

[15] 张艺武, 苏小四, 王骞迎, 等. 伊犁河谷西部平原区地表水与地下水转化关系研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(5): 664-674. [Zhang Yiwu, Su Xiaosi, Wang Qianying, et al. Surface water-groundwater interactions in the western plain of the Ili Valley[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2020, 56(5): 664-674.]

[16] 郝帅, 李发东, 李艳红, 等. 基于氢氧稳定同位素的艾比湖流域地表水与地下水转化关系[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 172-177, 185. [Hao Shuai, Li Fadong, Li Yanhong, et al. Transformation between surface water and groundwater in Ebinur Lake Basin based on hydrogen and oxygen stable isotopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 172-177, 185.]

[17] 郝帅, 李发东, 李艳红, 等. 艾比湖流域降水、地表水和地下水稳定同位素特征[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 934-942. [Hao Shuai, Li Fadong, Li Yanhong, et al. Stable isotopes characteristics of precipitation, surface water and groundwater in Ebinur Lake Basin[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 934-942.]

[18] Hao S, Li F D, Li Y H, et al. Stable isotope evidence for identifying the recharge mechanisms of precipitation, surface water, and groundwater in the Ebinur Lake Basin[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657: 1041-1050.

[19] 朱世丹. 艾比湖流域水质时空变化特征及驱动机制[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020. [Zhu Shidan. Spatial and temporal variation characteristics of water quality and its driving mechanism in Ebinur Lake Watershed[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2020.]

[20] 朱世丹, 张飞, 张海威, 等. 新疆艾比湖主要入湖河流同位素及水化学特征的季节变化[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1707-1721. [Zhu Shidan, Zhang Fei, Zhang Haiwei, et al. Seasonal variation of the isotope and hydrochemical characteristics of the main lake rivers in Lake Ebinur, Xinjiang[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1707-1721.]

[21] 丁建丽, 葛翔宇, 王敬哲. 中国艾比湖湿地识别及其时空动态变化[J]. 自然资源学报, 2021, 36(8): 1949-1963. [Ding Jianli, Ge Xiangyu, Wang Jingzhe. Ebinur Lake wetland identification and its spatio-temporal dynamic changes[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(8): 1949-1963.]

[22] 王瑾杰, 丁建丽, 张喆. 2008—2014年新疆艾比湖流域土壤水分时空分布特征[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1784-1794. [Wang Jinjie, Ding Jianli, Zhang Zhe. Temporal-spatial dynamic change characteristics of soil moisture in Ebinur Lake Basin from 2008—2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): 1784-1794.]

[23] 曹连江. 电子信息测量及其误差分析校正的研究[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 2017. [Cao Lianjiang. Study of electronic information measurement and its error analysis correction[M]. Changchu: Northeast Normal University Press, 2017.]

[24] Zhao B, Li Z, Li P, et al. Effects of ecological construction on the transformation of different water types on Loess Plateau, China[J]. Ecological Engineering, 2020, 144: 105642, doi: 10.1016/j.ecoleng.2019.105642.

[25] Tan H, Wen X, Rao W, et al. Temporal variation of stable isotopes in a precipitation-groundwater system: Implications for determining the mechanism of groundwater recharge in high mountain-hills of the Loess Plateau, China[J]. Hydrological Processes, 2016, 30 (10): 1491-1505.

[26] 李捷, 姜颖, 刘玉莲, 等. 凉水河流域地下水水化学特征和时空变化规律[J]. 中国环境科学, 2022, 42(4): 1847-1853. [Li Jie, Jiang Ying, Liu Yulian, et al. Hydrolochemical characteristics and spatial-temporal variations of groundwater in the Liangshui River Basin, Beijing[J]. China Environmental Science, 2022, 42(4): 1847-1853.]

[27] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16 (4): 436-468.

[28] 尹观, 倪师军, 张其春. 氘过量参数及其水文地质学意义——以四川九寨沟和冶勒水文地质研究为例[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(3): 251-254. [Yin Guan, Ni Shijun, Zhang Qichun. Deuterium excess parameter and geohydrology significance: Taking the geohydrology researches in Jiuzaigou and Yele, Sichuan for example[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28 (3): 251-254.]

[29] Wang S J, Zhang M J, Hughes C E, et al. Factors controlling stable isotope composition of precipitation in arid conditions: An observation network in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2016, 68(1): 26206, doi: 10.3402/tellusb.v68.26206.

[30] 袁瑞丰, 贾文雄, 李宗省, 等. 石羊河流域降水稳定同位素变化的区域差异[J]. 中国环境科学, 2020, 40(11): 4945-4956. [Yuan Ruifeng, Jia Wenxiong, Li Zongxing, et al. Precipitation stable isotope regional difference in Shiyang River Basin[J]. China Environmental Science, 2020, 40(11): 4945-4956.]

[31] Tan H, Liu Z, Rao W, et al. Understanding recharge in soil-groundwater systems in high loess hills on the Loess Plateau using isotopic data[J]. Catena, 2017, 156: 18-29.

[32] 玛尔胡拜·牙生, 马龙, 吉力力·阿不都外力, 等. 新疆天山西段夏季河流水化学特征及其影响因素研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 600-609. [Yasheng Maerhubai, Ma Long, Abuduwaili Jilili, et al. Hydrochemical characteristics and their influence on rivers in the western part of the Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 600-609.]

[33] Mohammed A M, Krishnamurthy R, Kehew A E, et al. Factors affecting the stable isotopes ratios in groundwater impacted by intense agricultural practices: A case study from the Nile Valley of Egypt[J]. Science of the Total Environment, 2016, 573: 707-715.

[34] Sun Z, Zhu G, Zhang Z, et al. Identifying surface water evaporation loss of inland river basin based on evaporation enrichment model [J]. Hydrological Processes, 2021, 35(3): e14093, doi: 10.1002/hyp.14093.

[35] 雷米, 周金龙, 张杰, 等. 新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系[J]. 环境科学, 2022, 43(4):

1873−1884. [Lei Mi, Zhou Jinlong, Zhang Jie, et al. Hydrochemical characteristics and transformation relationship of surface water and groundwater in the plain area of Bortala River Basin, Xinjiang [J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 1873−1884.]

Characteristics of groundwater in Ebinur Lake Basin using isotopes method

LIU Jingming[1,2,3], DING Jianli[1,2,3], BAO Qingling[1,2,3], ZHANG Zipeng[1,2,3], JIANG Leipeng[1,2,3], QU Yi[1,2,3]

(1. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 3. Key Laboratory of Smart City and Environment Modelling of Higher Education Institute, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China)

Abstract: Groundwater is important for regulating the water cycle and ecosystem in arid areas. Understanding and managing groundwater resources is the key to preventing the reduction of river baseflow, ground subsidence and water quality degradation. Therefore, this study analyzed the groundwater chemical parameters and hydrogen-oxygen stable isotope characteristics of the Ebinur Lake Basin, Xinjiang, China, and explored the sources of groundwater recharge, dynamic changes of water chemical components in different regions by combining linear regression, two-terminal mixed model and GIS spatial analysis. The results showed that: (1) Different circulation processes of groundwater existed in different areas of the Ebinur Lake Basin, with the largest of hydrogen and oxygen isotopes (δ^2H and $\delta^{18}O$) in the middle and lower reaches of the Bortala and Jing Rivers, followed by the area around Lake Ebinur Basin, and the smallest in the upper Bortala River area. (2) Deuterium excess parameter (*d*-excess) parameter and hydrochemical composition of groundwater reflected different groundwater recharge mechanisms and influencing factors. Groundwater in the upper Bortala River area was mainly recharged by glacial snow melt water. The main sources of groundwater in the middle and lower reaches of the Bortala and Jing Rivers were surface water and precipitation, which were also greatly influenced by the nature of rock formations, farmland development and irrigation measures. Groundwater around Lake Ebinur Basin mainly came from snow and ice melt and precipitation. The middle and lower reaches and groundwater in the river and lake confluence areas are the key areas for pollution prevention and control and management. (3) Different hydraulic connections existed in underground aquifers. The electrical conductance (EC) of flow system I ranged from 210.00 $\mu S\cdot cm^{-1}$ to 2500.00 $\mu S\cdot cm^{-1}$, and the *d*-excess ranged from 6.47‰ to 9.70‰. The EC of flow system II ranged from 141.60 $\mu S\cdot cm^{-1}$ to 5260.00 $\mu S\cdot cm^{-1}$, and the *d*-excess ranged from 9.61‰ to 17.45‰. In conclusion, this study investigated the driving mechanisms of hydrogen and oxygen isotopes and water chemistry in groundwater in the Lake Ebinur Basin, which provided some theoretical reference for the rational use and scientific development of groundwater resources in the basin.

Key words: hydrogen and oxygen isotopes; hydrochemical composition; groundwater recharge; groundwater flow system; Ebinur Lake Basin